DOI: 10.22067/jfcei.2022.73841.1081　　https://civil-ferdowsi.um.ac.ir/

بررسی ارتباط بین نتایج آزمایش SEM و پارامتر TSR برای سنجش شاخص حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی مواد ضدعریان‌شدگی*

مقاله پژوهشی

محمود عامری[۱]　حمید شاکر[۲]　امیرحسین عامری[۳]　سید امیر سعادتجو[٤]　سعید فاطمی[٥]　سید علی ضیائی[٦]

چکیده باتوجه به این‌که عریان‌شدگی یکی از خرابی‌های اصلی مخلوط‌های آسفالتی به‌شمار می‌رود روش‌ها و آزمون‌های خاصی برای ارزیابی این پدیده توسط آیین‌نامه‌های مختلف پیشنهاد شده‌است که ازجملهٔ آن‌ها می‌توان به آیین‌نامهٔ آشتو T284 و آزمایش آب‌جوشان اشاره کرد. از بین روش‌های بیان‌شده نتایج نامهٔ آشتو T284 باتوجه به عددی بودن نتایج دقت بیشتری در بررسی حساسیت رطوبتی دارد ولی آزمایش‌های کیفی مانند آب جوشان نیز باتوجه به راحتی آزمایش و هم‌چنین دید بصری می‌تواند مفید باشد. بر همین اساس در این تحقیق به بررسی عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی حاوی نانو مواد ضدعریان‌شدگی ازجمله زایکوترم، ایوانیک و نانوآهک پرداخته شده‌است. هم‌چنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از این نمونه‌ها برداشت شده و بااستفاده از نرم‌افزار متلب به‌صورت عدد و رقم تبدیل شده‌است تا ارتباط بین نتایج نامهٔ آشتو T284 و روش‌های بصری با دقت بیشتری مورد بررسی قرار گیرد. در کنار آزمایش‌های مربوط به عریان‌شدگی از آزمایش‌های مقاومت مارشال، مدول برجهندگی، خزش دینامیکی نیز برای بررسی خصوصیات مخلوط‌ها بهره گرفته شده‌است. نتایج این تحقیق نشان داده‌است که استفاده از بررسی کیفی مانند استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی می‌تواند نتیجهٔ کلی عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی را مشخص کند.

واژه‌های کلیدی عریان‌شدگی، شاخص‌های حساسیت رطوبتی، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی ، متلب.

مقدمه

یکی از اهداف اصلی طراحی و اجرای روسازی آسفالتی اطمینان از عملکرد آن در شرایط مختلفی است که روسازی در طول عمر خود با آن‌ها مواجه می‌گردد. برای رسیدن به این بهترین عملکرد در روسازی، مخلوط آسفالتی باید از کیفیت مناسبی در دوام و پایداری برخوردار باشد [1]. کیفیت روسازی آسفالتی به عوامل متفاوتی مانند کیفیت مصالح سنگی تشکیل‌دهنده، قیر مورداستفاده و اختلاط مناسب بین قیر و سنگ‌دانه مرتبط است [2].

در بین عوامل مطرح‌شده هرچند مقدار قیر ازنظر وزنی در مقابل سنگ‌دانه‌ها بسیار کم است اما نقش بسیار مهمی در عملکردهای مختلف روسازی ازنظر دوام و پایداری مخلوط‌های آسفالتی ایفا می‌کند و هر تغییری در قیر باعث تغییر در عملکرد مخلوط آسفالتی می‌گردد [3]. استفاده از افزودنی‌ها در قیر باهدف بهبود ویژگی‌های قیر صورت می‌گیرد و براساس ویژگی درنظر گرفته‌شده نوع افزودنی انتخاب و نحوهٔ اختلاط آن مشخص می‌گردد [4]. ازجمله موادی که در سال‌های اخیر برای اصلاح قیر مورد استفاده قرارگرفته‌اند می‌توان به مواد پلیمری، بازیافتی، نانومواد اشاره کرد که هر کدام بسته به هدف خاصی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [5] و [٦].

همان‌گونه که بیان شد کارایی روسازی‌های آسفالتی به اختلاط مناسب بین قیر و سنگ‌دانه‌ها و سیستم چسبندگی و پیوستگی بین آن‌ها وابستگی زیادی دارد و یکی از عمده‌ترین خرابی‌های روسازی یعنی عریان‌شدگی در اثر نفوذ آب بین

---

* تاریخ دریافت مقاله ۱٤۰۰/۹/۳و تاریخ پذیرش آن ۱٤۰۰/۱۰/۱۸ می‌باشد.

(۱) نویسنده مسئول: استاد، گروه راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران　**Email**: ameri@iust.ac.ir
(۲) دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
(۳) دانش آموخته کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
(٤) دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
(٥) دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشگاه فردوسی مشهد.
(٦) استادیار، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

سنگ‌دانه‌ها و چسبندۀ قیری اتفاق افتاده که درنتیجۀ آن با از بین رفتن پیوستگی در ارتباط با چسبندۀ قیری و سنگ‌دانه اتفاق می-افتد که درنتیجۀ این عمل عریان‌شدگی به وقوع می‌پیوندد [۷] و [۸]. معمولاً استفاده از سنگ‌دانه‌های مناسب در مخلوط‌های آسفالتی می‌تواند مانع عریان‌شدگی گردد با این و جود اصلاح قیر نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده از قیرهای اصلاح‌شده می‌تواند به کاهش عریان‌شدگی منجر شود [9]. مواد ضدعریان‌شدگی علاوه‌بر تأثیر بر پیوند بین سنگ‌دانه و قیر می‌توانند موجب تغییر در سختی و مقاومت شیارشدگی و افزایش و کاهش روند رشد ترک‌ها نیز گردند [10]. برای بررسی عریان‌شدگی در مخلوط‌های آسفالتی آزمایش‌های مختلفی توسط آیین‌نامه‌های معتبر بیان شده‌است که ازجملۀ آنها می‌توان به آزمایش AASHTO T283 و آزمایش آب جوشان ASTM D3625 اشاره کرد [11] و [12]. برطبق روش آشتو برای بررسی عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی ابتدا نمونه‌هایی با فضای خالی ٦ تا ٨ درصد ساخته می‌شوند. برای هر نمونۀ مورد بررسی ٦ نمونه ساخته می‌شود. سه نمونه در دمای محیط، مورد آزمایش کشش غیرمستقیم قرار می‌گیرند و سه نمونه به‌صورت تر (بعد از طی یک دورۀ ذوب و انجماد) مورد آزمایش قرار می‌گیرند و درنهایت پارامتر TSR از تقسیم مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم‌تر به مقاومت کششی غیرمستقیم خشک به‌صورت درصدی بیان می‌شود که این عدد بیانگر مقدار عریان‌شدگی مخلوط آسفالتی می‌باشد [11]. حداقل مقدار پارامتر TSR در آیین‌نامۀ روسازی ایران برابر با ۷۵ درصد درنظر گرفته شده‌است [12]. در روش آبجوشان که توسط ASTM پیشنهاد شده‌است مقدار عریان‌شدگی به‌صورت کیفی مورد بررسی قرار می‌گیرد در این آزمایش ۲۵۰ گرم از نمونه که به‌روش چارک جدا شده‌است در حدود ۸۰۰ میلی‌لیتر آب در حال جوش به‌مدت ده دقیقه قرار می‌گیرد و در انتها نمونه‌ها به‌صورت بصری مورد بررسی قرار می‌گیرند [12].

از طرفی در سال ۱۹۹۳ در دانشگاه کالیفرنیای جنوبی برای اولین‌بار پردازش تصویر از نمونه‌های مخلوط آسفالتی انجام شد. هدف اصلی که این تحقیق برمبنای آن انجام گرفت مطالعۀ داخل هستۀ آسفالت بعد از اجرا و یافتن تغییر شکل و خرابی قبل و بعد از بارگذاری بوده‌است [14]. بعدها از روش‌های مختلف پردازش تصویر به‌منظور مدل‌سازی سه‌بعدی نمونه‌های آسفالتی استفاده شد [15] و [16]. در سال ۲۰۱۳ تجزیه‌وتحلیل ساختار مخلوط آسفالت بااستفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر دیجیتال توسط کی هونمون انجام شد [17]. که براساس تحقیقات زلزلو و همکارانش توسعه یافته‌است [18]. در این تحقیق، اجزای مختلف مخلوط آسفالتی و اطلاعات حجمی مورد بررسی قرار گرفته‌است. روش‌های استفاده‌شده برپایۀ تشخیص آستانه بین هوا، ماستیک (قیر و فیلر) و سنگ‌دانه براساس اطلاعات آزمایشگاهی است.

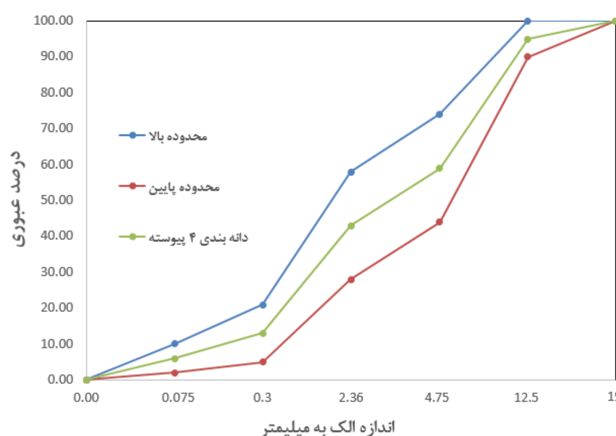
هدف اصلی در این تحقیق بررسی مشخصات مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیر اصلاح‌شده با نانوآهک، زایکوترم و ایوانیک بوده و در کنار آن به بررسی ارتباط بین نتایج آزمایش SEM با نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی به‌روش پیشنهادی AASHTO T283 پرداخته شده‌است.

مواد و روش‌ها

مواد و مصالح

در این تحقیق از مصالح سنگی مستخرج شده از معدن اسب چران دماوند مطابق با دانه‌بندی شکل (۱) استفاده شده‌است. این دانه‌بندی طبق رتبه‌بندی نشریۀ ۲۳٤ ایران مطابق دانه‌بندی شمارۀ چهار پیوسته می‌باشد. مشخصات مصالح سنگی در جدول شماره (۱) بیان شده‌است. هم‌چنین از قیر با درجۀ نفوذ ٦۰/۷۰ مطابق جدول (۲) به‌صورت استاندارد استفاده شده‌است.

برای بهبود عریان‌شدگی مخلوط‌های آسفالتی در این تحقیق و هم‌چنین بررسی روش پیشنهادی که مرتبط با عریان‌شدگی است از نانومواد زایکوترم، ایوانیک و نانوآهک مطابق با مشخصات جدول (۳) استفاده شده‌است. مواد فوق بااستفاده از دستگاه هم‌زن دور بالا (high shear) با قیر مخلوط شده‌است. درصد ترکیب هر ماده با قیر مطابق با جدول (٤) می‌باشد



شکل ۱ دانه‌بندی مصالح کاربردی

جدول ۱ مشخصات مصالح سنگی

شرح	استاندارد آزمایش	حدود مجاز طبق نشریه ۲۳۴		نتایج آزمایش
		آستر	رویه	
حداکثر سایش به روش لوس‌آنجلس (درصد) برای مصالح درشت‌دانه	AASHTO T96	۳۰	۲۵	۲۳
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد) برای مصالح درشت‌دانه	AASHTO T104	۸	۸	۰/۱
سنگ‌دانه‌های پهن و دراز (درصد) برای مصالح درشت‌دانه	ASTM D4791	۱۵	۱۵	۰/۳
حداکثر درصد جذب آب درشت دانه	AASHTO T85	۲/۵	۲/۵	۲/۲
افت وزنی در مقابل سولفات سدیم (درصد) برای مصالح ریزدانه	AASHTO T104	۱۲	۱۲	۱/۰
حداکثر درصد جذب آب ریز دانه	AASHTO T84	۲/۸	۲/۵	۲/٤

جدول ۲ مشخصات فنی قیر مصرفی

خصوصیات	روش آزمایش	حدود استاندارد		قیر ۷۰–۶۰
		حد پایین	حد بالا	
وزن مخصوص در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	ASTM D70	۱/۰۱	۱/۰٦	۱/۰۳
درجه نفوذ در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	ASTM D5	٦۰	۷۰	٦٦
نقطه نرمی (درجه سانتی‌گراد)	ASTM D36	٤۹	٥٦	٥۳
انگمی در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	ASTM D113	۱۰۰	--	۱۰۳
نقطه اشتعال (درجه سانتی‌گراد)	ASTM D92	۲٥۰	--	۳۰۰
حلالیت در دی سولفید (درصد)	ASTM D4	--	--	٥/۹۹
افت وزنی در اثر حرارت (درصد)	ASTM D6	--	--	۰/۲

جدول ۳ خصوصیات افزودنی‌های مورد استفاده

زایکوترم	وزن مخصوص	نوع ماده	درجه اشتعال
	۰/۹۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب	مایع بدون بو و زرد رنگ	۸۰ درجه سانتی‌گراد
ایوانیک	نوع ماده	ارزش اسید	ارزش آمین
	مایع شفاف	۳۵	۱٥۰
نانو آهک	ترصد افت وزنی در برابر حرارت	$Ca(OH)^2$	CaO
	۱۰/۹	۹۲	۰/۵

جدول ٤ ترکیبات استفاده‌شده در تحقیق

نام ترکیب	اصلاح‌کننده	درصد مورداستفاده
نمونه شاهد	بدون اصلاح‌کننده	۰
نمونه اصلاح‌شده با نانو آهک	نانو آهک	۲ درصد قیر (ساعدی و همکاران ۱۳۹۷)
نمونه اصلاح‌شده با ایوانیک	ایوانیک	۰/۱ درصد قیر (عامری و همکاران ۱۳۹٦)
نمونه اصلاح‌شده با زایکوترم	زایکوترم	۰/۱ درصد قیر (Mirzababaei, 2016)

اختلاط هر سه افزودنی بااستفاده از دستگاه هم‌زن دور بالا (High Shear) و در دمای ۱٦۰ درجهٔ سانتی‌گراد و با سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه و به‌مدت ۳۰ دقیقه انجام گرفته‌است. درصد قیر بهینه برای نمونهٔ شاهد طبق روش مار شال برابر ۵/۱۰ برای نمونهٔ حاوی زایکوترم برابر ۵/۱٦، برای نمونهٔ حاوی ایوانیک برابر ۵/۱۵ و برای نمونهٔ حاوی نانوآهک برابر ۵/۳۱ به‌دست آمد. لازم به ذکر است ساخت نمونه‌های مورداستفاده برای انجام آزمایش‌های اصلی بااستفاده از دستگاه تراکم ژیراتوری صورت گرفته‌است.

روش آزمایش‌ها

آزمایش کشش غیرمستقیم. ساخت و تست نمونه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش کشش غیرمستقیم در این تحقیق براساس استاندارد AASHTO T283 انجام شده‌است [11]. بر همین اساس نمونه‌های ۱۲۰۰ گرمی با دستگاه ژیراتوری و با درصد فضای خالی ۷ درصد متراکم شدند. سپس نمونه‌ها به دو سری تر و خشک تقسیم شدند. درنهایت نمونه‌های خشک در دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد مورد تست قرار گرفتند. نمونه‌های تر ابتدا بااستفاده از وکیوم کردن بیش از ۸۵ درصد اشباع گردیدند و به‌مدت ۱٦ ساعت در دمای منفی ۱۷ درجهٔ سانتی‌گراد نگه‌داری شدند و سپس به‌مدت ۲٤ ساعت در آب با دمای ٦۰ درجهٔ سانتی‌-گراد نگه‌داری شد و درنهایت دو ساعت در آب دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد نگه‌داری شدند و مورد تست قرار گرفتند.

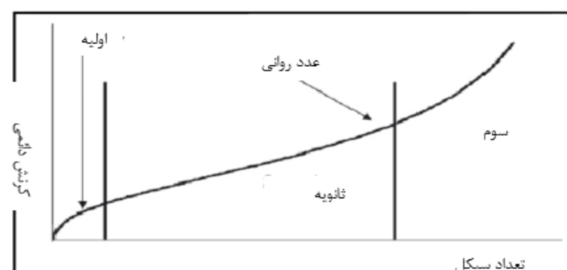
آزمایش مقاومت مارشال. استقامت مارشال به‌طور چشم‌گیری با زاویهٔ اصطکاک داخلی مصالح و ویسکوزیتهٔ قیر در دمای ٦۰ درجهٔ سانتیگراد تحت تأثیر قرار می‌گیرد. به‌طور کلی می‌توان گفت که مقدار استقامت مارشال نشان‌دهندهٔ توانایی مخلوط آسفالتی برای مقاومت در برابر شیارشدگی و برآمدگی تحت بارگذاری‌های سنگین ترافیکی می‌باشد.

آزمایش مقاومت مارشال در این تحقیق طبق استاندارد ASTM D 1559 انجام شد [19]. بر همین ا ساس ابتدا نمونه‌ها با دستگاه تراکم مارشال متراکم شدند و سپس به‌مدت نیم ساعت در دمای ٦۰ درجهٔ سانتی‌گراد نگه‌داری شدند و درنهایت با دستگاه شکست مارشال مورد آزمون قرار گرفتند.

آزمایش مدول برجهندگی. آزمایش مدول برجهنگی یک آزمایش غیرمخرب می‌باشد که در آن، بارهای اعمال‌شده به نمونه کوچک هستند. این آزمایش توسط دستگاه UTM انجام شد. مدول برجهندگی را با نماد (MR) نشان می‌دهند و مقداری که MR نشان می‌دهد حداکثر انرژی قابل تحمل برای واحد حجم مخلوط آسفالتی است به‌گونه‌ای که هیچ تغییر شکل دایمی به‌وجود نیاید و با باربرداری مخلوط به حالت اول خود برگردد. مقدار MR با انتگرال‌گیری از ناحیهٔ محصورشدهٔ نمودار تنش–کرنش به‌دست می‌آید.

در این تحقیق نمونه‌های موردنیاز برای انجام آزمایش مدول برجهندگی بااستفاده از دستگاه ژیراتوری و طبق استاندارد ASTM D 3387 متراکم شد. درنهایت به‌مدت ۲ ساعت در دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد نگه‌داری و طبق استاندارد ASTM D4123 با اعمال بار به‌اندازهٔ ٤۰۰ نیوتن، به‌صورت نیمه‌سینوسی با ۰/۵ثانیه بارگذاری و ۱/۵ ثانیه باربرداری، در دمای ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار گرفتند.

آزمایش خزش دینامیکی. برای انجام آزمایش خزش دینامیکی طبق استاندارد Australian code AS 2891-12 نمونه‌های با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر و درصد فضای خالی ۵ درصد ساخته شد. درنهایت بااستفاده از دستگاه UTM25 بار ٤۵۰ کیلو پاسکال در دمای ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد و به‌صورت مربعی‌شکل به نمونه اعمال گردید و برپایهٔ تئوری ویتزک تعداد دفعات بارگذاری تا شروع ناحیهٔ سوم به‌عنوان عدد روانی و خروجی آزمایش گزارش شد.



شکل ۲ منحنی کرنش تجمعی کل در برابر سیکل بارگذاری در آزمایش خزش

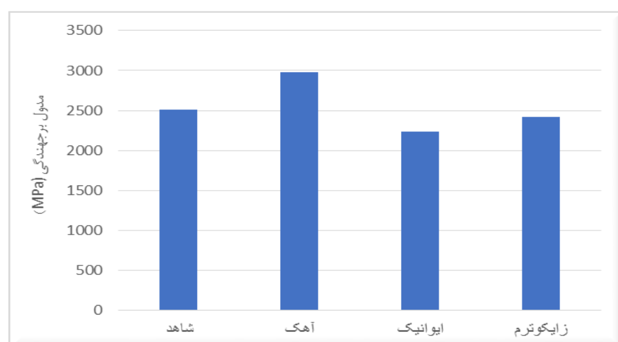
آزمایش SEM. برای انجام این آزمایش ابتدا به‌روش چارک ۲۵۰ گرم از مخلوط جدا شده و در آب جوشان به‌مدت ۱۰ دقیقه قرار گرفته‌است. برای این کار از استاندارد آزمایش آب‌جوشان مطابق آیین‌نامۀ ASTM D3625 بهره گرفته‌شده‌است. سپس مصالح حدوداً ۱/۲ گرم جدا می‌شوند و در دستگاه میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) قرار می‌گیرند و تصاویر با زوم ۵۰۰ برابری برداشت می‌شود.

پردازش تصاویر با متلب. برای به‌دست آوردن اعداد کمی برای انطباق‌سازی با نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی که از طریق آزمون کشش غیرمستقیم به‌دست آمده‌است در این تحقیق از نرم‌افزار متلب استفاده شده‌است. برای این کار ابتدا تصاویر به‌صورت سیاه‌وسفید تبدیل‌شده و با نسبت دادن سری اعداد به هرکدام از رنگ‌های طیف انجام گرفته‌است. درنهایت درصد هر طیف رنگ سیاه‌وسفید ملاکی برای ارزیابی درنظر گرفته می‌شود.

نتایج

مدول برجهندگی

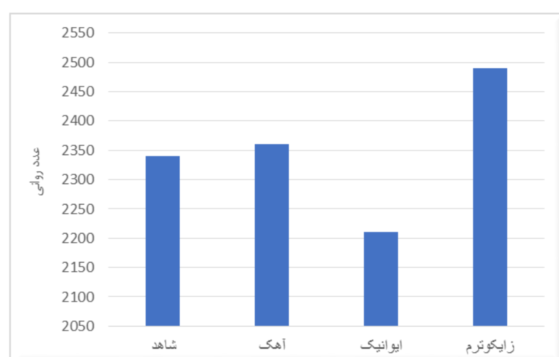
نتایج آزمایش مدول برجهندگی نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق در شکل (۳) نشان داده‌شده‌است. آزمایش مدول برجهندگی از آن جهت مورد بررسی قرار می‌گیرد که به بررسی سخت‌شدگی مخلوط می‌پردازد و پارامتری مهم برای تعیین ضخامت در اختیار طراح قرار می‌دهد. همان‌گونه که از نتایج مشخص است نانوآهک باعث افزایش مدول برجهندگی مخلوط شده و زایکوترم و ایوانیک باعث کاهش مدول برجهندگی شده‌اند. نانوآهک با افزایش سختی قیر باعث افزایش سختی مخلوط آسفالتی می‌گردد، ولی ایوانیک باعث کاهش سختی قیر می‌شود [۲۰] و به همین دلیل باعث کاهش مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی شده‌است. از طرفی زایکوترم همان‌گونه که در نتایج تحقیقات دیگر [۲۰] پیداست باعث تغییر بسیار ناچیزی در سختی و به‌تبع آن در مدول برجهندگی مخلوط آسفالتی شده‌است.



شکل ۳ نتایج آزمایش مدول برجهندگی

خزش دینامیکی

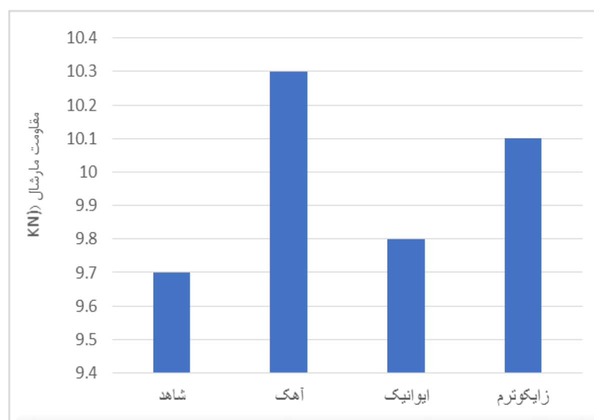
در این تحقیق، عدد روانی براساس پیشنهاد NCHRP Project 09-33، برای ارزیابی مقاومت شیارشدگی مخلوط آسفالتی مورد استفاده قرار گرفته‌است. عدد روانی برای نمونه‌های این تحقیق در شکل (٤) ارائه شده‌است. همان‌گونه که از شکل برمی‌آید نتایج مربوط به خزش دینامیکی برای نمونه‌ها روندی متفاوت دارد. در این نمودار شاهد بهبود قابل‌ملاحظۀ عدد روانی برای نمونۀ حاوی زایکوترم هستیم. نمونۀ حاوی آهک نیز افزایش داشته‌است اما این افزایش به‌مانند زایکوترم آشکار نیست. در مقابل نمونۀ حاوی ایوانیک روند کاهشی را نشان می‌دهد، به‌گونه‌ای که این عدد روانی خیلی پایینی نسبت‌به نمونۀ شاهد دارد. باتوجه به این نمودار می‌توان گفت استفاده از زایکوترم و آهک باعث بهبود شیارشدگی مخلوط می‌شوند ولی استفاده از ایوانیک نه‌تنها بهبودی در شیارشدگی پدید نمی‌آورد بلکه به‌صورت جزئی مقاومت دربرابر شیار شدگی را کاهش می‌دهد.



شکل ٤ نتایج آزمایش خزش دینامیکی

مقاومت مارشال

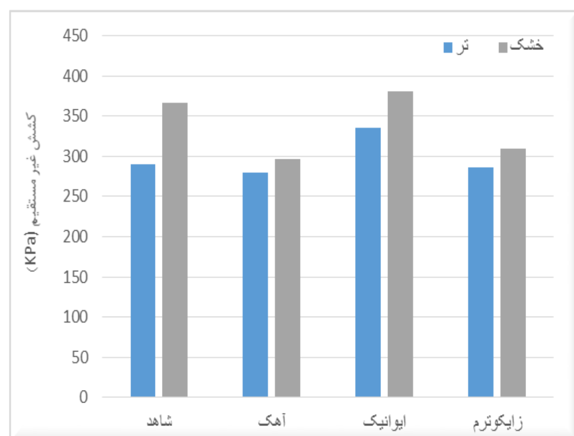
نتایج مربوط به آزمایش مقاومت مارشال در شکل (۵) نشان داده‌شده‌است. همان‌گونه که از نمودار برمی‌آید همهٔ افزودنی‌ها تأثیر مثبتی در استقامت مارشال داشته‌اند و این تأثیر مثبت برای نمونه‌های مختلف متفاوت می‌باشد. برای نمونه‌های حاوی نانوآهک این مقدار بیشتر و برای نمونهٔ مربوط به ایوانیک این مقدار کمتر است. دلیل این تغییرات را به‌نوعی می‌توان به‌سختی ناشی از اضافه شدن مادهٔ اصلاح‌کننده نسبت داد چراکه نانوآهک مقدار بیشتری سختی را افزایش داده و ایوانیک باعث کاهش سختی شده‌است. از طرفی زایکوترم که تأثیر چندانی در مدول برجهندگی و سختی ندارد تفاوتی مابین ایوانیک و نانوآهک ایجاد کرده‌است.



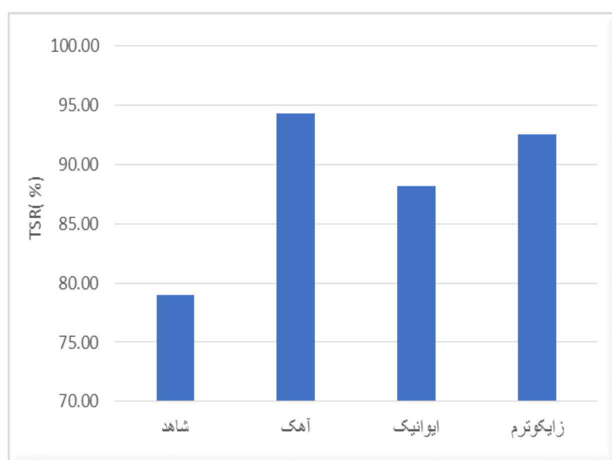
شکل ۵ نتایج آزمایش مقاومت مارشال

مقاومت کشش غیرمستقیم

شکل (٦) نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم را در دو حالت تر و خشک نشان می‌دهد. همان‌گونه که از نتایج برمی‌آید اصلاح‌کننده‌ها تغییرات زیادی را در نمونه‌ها ایجاد کرده‌است و هر دو مقاومت تر و خشک را دست‌خوش تغییر قرار داده‌اند. در بین نتایج، ایوانیک با افزایش هر دو مقاومت‌تر و خشک همراه بوده که با ادعای گروه سازندهٔ این ماده نیز هم‌خوانی دارد. از طرفی استفاده از نانوآهک و زایکوترم باعث کاهش ناچیز در مقاومت تر و کاهش بیشتر در مقاومت خشک بوده‌است.



شکل ٦ نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم



شکل ۷ نتایج آزمایش حساسیت رطوبتی بر اساس پارامتر TSR

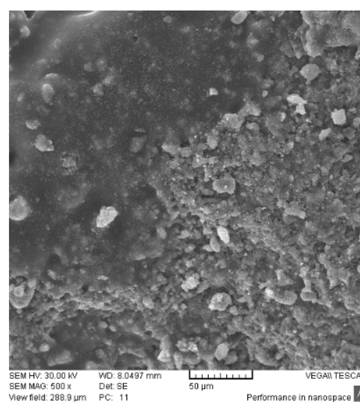
حساسیت رطوبتی

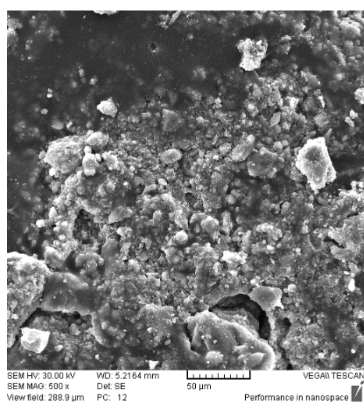
پارامتر TSR به‌عنوان پارامتری برای تعریف حساسیت رطوبتی استفاده می‌شود. این پارامتر از تقسیم مقاومت کششی غیرمستقیم تر به مقاومت کششی غیرمستقیم خشک اطلاق می‌شود. نتایج مربوط به این پارامتر برای اصلاح‌کننده‌های مورداستفاده در این تحقیق در شکل (۷) نشان داده‌شده‌است. همان‌گونه که از نتایج پیداست هر سه اصلاح‌کننده سبب افزایش مقاومت دربرابر عریان‌شدگی شده‌اند که در این بین مقدار مربوط به مخلوط حاوی نانوآهک بیشتر از دو افزودنی دیگر است. در توجیه روند مشاهده‌شده می‌توان چنین بیان کرد که هرچه‌قدر مقدار مقاومت کششی تر و خشک به هم نزدیک‌تر باشند مقدار حساسیت رطوبتی بهتر خواهد بود حال آن‌که این نزدیک شدن با کاهش مقدار مقاومت کششی خشک همراه شود یا افزایش مقدار مقاومت کششی تر، بستگی به خصوصیات مادهٔ مورداستفاده دارد؛

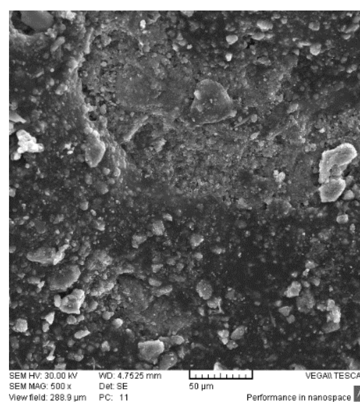
به‌عنوان‌مثال برای نمونهٔ حاوی نانوآهک و زایکوترم بهبود حساسیت رطوبتی با کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم خشک اتفاق افتاده حال آن‌که برای نمونهٔ حاوی ایوانیک این اتفاق با افزایش مقاومت‌های تر و خشک اتفاق افتاده‌است.

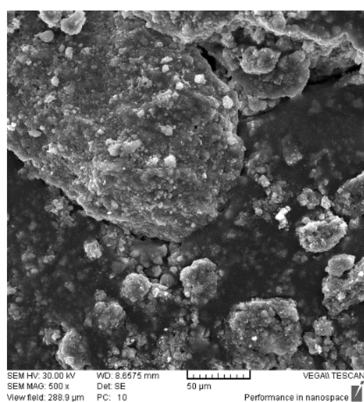
SEM

نتایج به‌دست‌آمده از تصاویر SEM در شکل (۸) گزارش شده‌است. در این تصاویر محل‌های سفید نشان از وجود قیر دارد و محل‌های سیاه نشان از وجود قیر کمتر دارد.


SEM مربوط به نمونه شاهد


SEM مربوط به نمونه اصلاح‌شده با نانو آهک


SEM مربوط به نمونه اصلاح‌شده با ایوانیک


SEM مربوط به نمونه اصلاح‌شده با زایکوترم

شکل ۸ نتایج آزمایش SEM برای نمونه‌های اصلاح‌شده و اصلاح‌نشده

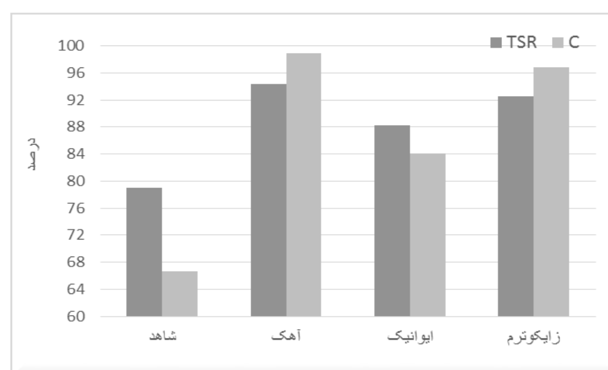
جدول ۵ نتایج خروجی متلب برای نمونه‌های SEM

نام نمونه	درصد بخش عریان شده (A)	درصد بخش عریان نشده (B)	C=100*((B-A)/B)
شاهد	۲۲/٤	۷۵/٦۰	٦۷/۷۲
اصلاح‌شده با آهک	۱/۰۸	۹۸/۹۲	۹۸/۹۱
اصلاح‌شده با ایوانیک	۱۳/۷۵	۸٦/۲۵	۸٤/۰٦
اصلاح‌شده با زایکوترم	۳/۱۲	۹٦/۸۸	۹٦/۷۸

مقایسه نتایج حساسیت رطوبتی

تصاویر برداشت‌شده به‌وسیلهٔ SEM (شکل ۸) وارد محیط نرم‌افزار متلب شده و نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۵) گزارش شده‌است. در این جدول پارامتری به‌نام پارامتر C معرفی شده‌است که این پارامتر از بررسی نتایج برداشت‌های مختلف و بررسی خروجی‌های مختلف نرم‌افزار متلب توسط محققان این تحقیق پیشنهاد شده‌است. درنهایت این پارامتر با پارامتر TSR به‌دست‌آمده از حساسیت رطوبتی مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج این مقایسه در شکل (۹) گزارش شده‌است.

همان‌گونه که در شکل (۹) مشخص است هم‌بستگی تقریبی بین پارامتر C و پارامتر TSR وجود دارد. هرچند تفاوت‌هایی بین این دو عدد وجود دارد اما استفاده از روش یادشده کیفی است و می‌توان خروجی آن را به‌عنوان روشی برای بررسی عریان‌شدگی مطرح کرد.



شکل ۹ مقایسه پارامتر C و ضریب TSR

جمع‌بندی

در این تحقیق به مطالعهٔ خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی حاوی قیرهای اصلاح‌شده با نانوآهک، ایوانیک و زایکوترم پرداخته شده‌است. هم‌چنین برای بررسی خصوصیات حساسیت رطوبتی در کنار آیین‌نامهٔ AASHTO T283، مقدار عریان‌شدگی بااستفاده از تصاویر SEM موردبررسی قرار گرفته و بااستفاده از نرم‌افزار متلب کمی‌سازی شده‌است. درنهایت با مقایسه بین نتایج TSR و پارامتر C که از کمی‌سازی نتایج تصاویر برداشت‌شده با SEM به‌دست آمده‌است برای مقایسهٔ نتایج استفاده شده‌است. نتایج کلی به‌دست‌آمده در این پژوهش عبارتند از:

۱. نتایج آزمایش مدول برجهندگی مخلوط‌های اصلاح‌شده و نشده نشان می‌دهد که استفاده از زایکوترم و آهک باعث کاهش سختی مخلوط‌ها می‌شوند.

۲. نتایج آزمایش خزش دینامیکی نشان می‌دهد که استفاده از آهک و زایکوترم باعث بهبود شیارشدگی می‌شوند و در بین این دو ماده زایکوترم تأثیر بهتری دارد و در مقابل ایوانیک به‌صورت جزئی مقدار مقاومت شیارشدگی را کاهش می‌دهد.

۳. از نتایج آزمون استقامت مارشال می‌توان مشاهده کرد که هر سه افزودنی باعث بهبود مقاومت فشاری مخلوط می‌شوند و در بین این مواد آهک، زایکوترم و ایوانیک به‌ترتیب بیشترین مقدار را نسبت‌به نمونهٔ شاهد کسب کرده‌اند.

٤. نتایج کشش غیرمستقیم باتوجه به نتایج آزمایش کشش غیرمستقیم، در بین نمونه‌های اصلاح‌شده ایوانیک شرایط بهتری را دارد چراکه بهبود حساسیت رطوبتی را با افزایش مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم به‌دست می‌دهد. در مقابل نمونهٔ حاوی آهک و زایکوترم اگرچه حساسیت رطوبتی بهتری نسبت‌به نمونهٔ ایوانیک دارند ولی این بهبود در حساسیت رطوبتی را با کاهش مقاومت کششی غیرمستقیم کسب می‌کنند.

۵. نتایج مربوط به پارامتر TSR و آب جوشان نشان می‌دهد که برای عریان‌شدگی هر سه مادهٔ ایوانیک، زایکوترم و آهک مناسب هستند و هر سهٔ این مواد شرایط بهتری را نسبت‌به نمونهٔ شاهد کسب کرده‌اند و در بین این مواد آهک شرایط بهتری نسبت‌به بقیهٔ مواد دارد.

٦. نتایج مربوط به حساسیت رطوبتی نشان داد که استفاده از نانوآهک تأثیر بیشتری نسبت‌به دو افزودنی دیگر دارد. این مقایسه براساس پارامتر C که از کمی‌سازی نتیجهٔ آزمایش SEM به‌دست‌آمده بود نیز قابل‌برداشت است.

۷. نتایج آزمایش SEM نشان داد که نتایج این آزمایش کیفی نیز می‌تواند دربرگیرندهٔ نتایج آزمایش‌های کمی باشد. حال‌آن‌که برای انجام آزمایش‌های کمی حساسیت رطوبتی مراحل طولانی است و نیاز به زمان و تجهیزات بیشتری نسبت‌به آزمایش SEM دارد.

۸. نتایج مربوط به بررسی ارتباط بین آزمایش SEM و آزمایش‌های کمی حساسیت رطوبتی نشان داد که درواقع

آزمایش‌های کیفی به‌دست‌آمده از SEM از دقت مناسبی برخوردار هستند.

مراجع

1. Ameri, M., Shaker, H., Badarloo, B., & Jafari, F., "Numerical and Experimental Investigation on the Modified of Hot Mix Asphalt Concrete Containing Crumb Rubber and Waste Pet", *Tehnički vjesnik,* Vol. 27, No. 4, pp. 1186-1193, (2020). ,
2. Ameri, M., Mohammadi, R., Mousavinezhad, M., Ameri, A., Shaker, H., & Fasihpour, A., "Evaluating Properties of Asphalt Mixtures Containing polymers of Styrene Butadiene Rubber (SBR) and recycled Polyethylene Terephthalate (rPET) against Failures Caused by Rutting", *Moisture and Fatigue, Frattura ed Integrità Strutturale,* Vol. 14, No. 53, pp. 177-186, (2020).
3. Jahanian, H. R., Shafabakhsh, G. H., & Divandari, H., "Performance evaluation of Hot Mix Asphalt (HMA) Containing Bitumen Modified with Gilsonite", *Construction and Building Materials,* Vol. 131, **pp**. 156-164, (2017).
4. Ameri, M., Nemati, M., & Shaker, H., "Experimental and Numerical Investigation of the Properties of the Hot Mix Asphalt Concrete with Basalt and Glass Fiber", *Frattura ed Integrità Strutturale,* Vol. 13, No. 50, pp. 149-162, (2019).
5. Mansourian, A., Ameri, M., Mirabi Moghaddam, M. H., Riahi, E., Shaker, H., & Ameri, A. H., "Behavioural Mechanism of SBR, LDPE, and SBS Modified Bituminous Mixtures", *Australian Journal of Civil Engineering,* pp. 1-10, (2021).
6. عامری، ا.، عامری، م.، شاکر، ح.، کرم رودی، م.، "ارزیابی آزمایشگاهی خصوصیات رئولوژیکی و فیزیکی قیر اصلاح‌شده با پودر لاستیک و پلیمر EVA"، مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، (۳)۶، صص. ۱- ۱۲، (۱۳۹۹).
7. عامری، ا.، عامری، م.، شاکر، ح.، جعفری، ف.، بدرلو، ب.، "ارزیابی اثر افزودنی دوگانهٔ پودر لاستیک و PET به صورت عددی و آزمایشگاهی در مخلوط آسفالتی گرم"، *نشریهٔ مهندسی عمران امیرکبیر*، (۱)۵٤، ص. ۱۲، (۱٤۰۱).
8. عامری، م.، منصوریان، ا.، شاکر، ح.، عامری، ا.، "تعیین مقدار مناسب استفاده از ترکیب سربارهٔ ریزدانه و درشت‌دانه براساس خصوصیات مکانیکی مخلوط‌های آسفالتی بااستفاده از روش سطح پاسخ"، مهندسی زیر ساخت‌های حمل و نقل، (۳)۷، صص. ۱۱–۲۰، (۱٤۰۰).
9. Farazmand, P., Hayati, P., Shaker, H., & Rezaei, S., "Relationship between Microscopic Analysis and Quantitative and Qualitative Indicators of Moisture Susceptibility Evaluation of Warm-Mix Asphalt Mixtures Containing Modifiers", *Frattura ed Integrità Strutturale,* Vol. 14, No. 51, pp. 215-224, (2020).
10. Yilmaz, M., & Yalcin, E., "The Effects of Using Different Bitumen Modifiers and Hydrated Lime Together on the Properties of Hot Mix Asphalts", *Road Materials and Pavement Design,* Vol. 17, No. 2,, pp. 499-511, (2016).
11. American Association of State Highway and Transportation Officials, "Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage", Aashto T283-99, Washington D.C., USA, (2000).
12. American Society for Testing and Materials, "Standard Practice for Effect of Water on Bituminous Coated Aggregate Using Boiling Water", ASTM D 3625-96, West Conshohocken, PA, USA, (2001).
13. آیین‌نامهٔ روسازی آسفالتی راه‌های ایران (نشریه ۲۳٤)، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور، (۱۳۹۰).
14. Wang, H., & Hao, P., "Numerical Simulation of Indirect Tensile Test Based on the Microstructure of Asphalt

Mixture", *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. Vol. 23, No. 1, 21-29, (2011).

15. Moon, K. H., Falchetto, A. C., & Jeong, J. H., "Microstructural Analysis of Asphalt Mixtures Using Digital Image Processing Techniques", *Canadian Journal of Civil Engineering,* Vol. 41, No. 1, pp.74-86, (2014).
16. Zelelew, H. M., Papagiannakis, A. T., & Masad, E., "Application of Digital Image Processing Techniques for Asphalt Concrete Mixture Images", *In The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, pp. 119-124, (2008, October).
17. Nejad, F. M., Motekhases, F. Z., Zakeri, H., & Mehrabi, A., "An Image Processing Approach to Asphalt Concrete Feature Extraction", *Journal of Industrial and Intelligent Information*, Vol. 3, No. 1, pp. 54-60**,** (2015).
18. Al-Qadi, I. L., Leng, Z., Lahouar, S., & Baek, J., "In-Place Hot-Mix Asphalt Density Estimation Using Ground-Penetrating Radar", *Transportation research record,* Vol. 2152, No. 1, pp. 19-27. (2010).
19. American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus", ASTM D1559, West Conshohocken, PA, USA, (2000)

۲۰. امیری، ایمان. «ارزیابی اثر نانومواد و مواد ضدعریان‌شدگی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی»، پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد، تهران: دانشکدهٔ مهندسی عمران، گروه مهندسی راه و ترابری، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۹۵).

۲۱. ساعدی، د.، قهرمانی، ح. و حامدی، غ.، «ارزیابی آزمایشگاهی تأثیر قیر اصلاح شده با نانوآهک هیدراته برروی حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالت شیشه‌ای»، دومین کنگرهٔ ملی توسعهٔ زیرساخت‌های فناور صنعت راه و ساختمان ایران، تهران، (۱۳۹۷).

۲۲. عامری، م.، وامق، م.، امیری، ا.، چاو شیان نائینی، س. ف.، «ارزیابی عملکرد حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی حاوی ایوانیک و زایکوترم»، *فصلنامهٔ مهندسی حمل و نقل* ۹ (ویژه‌نامهٔ روسازی)، صص. ۲۷–٤۲، (۱۳۹٦).

23. Mirzababaei, P., “Effect of Zycotherm on moisture susceptibility of Warm Mix Asphalt mixtures prepared with different aggregate types and gradations ", *Construction and Building Materials*, Vol. 116, pp. 403-412, (2016).